

# 黄土覆盖区采动地表裂缝对土壤水分扰动影响的模拟试验研究

汤伏全<sup>1</sup>, 贾晓卉<sup>1</sup>, 侯恩科<sup>2</sup>, 樊志刚<sup>3</sup>, 马婷<sup>1</sup>, 王聪<sup>1</sup>

(1.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2.西安科技大学

地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3.陕西彬长文家坡矿业有限公司, 陕西 咸阳 713504)

**摘要:** [目的] 探究黄土覆盖区煤矿开采沉陷变形造成的地表裂缝对土壤水分变化的扰动效应, 为采煤沉陷区土壤水分变化规律研究提供数据支撑。[方法] 以典型黄土覆盖区的采煤沉陷区为模型, 使用自主研发的开采沉陷地表裂缝模拟装置进行物理模拟试验, 并在裂缝周围布设水分传感器, 分析地表裂缝引起的土壤水分变化特征。利用 Hydrus 软件构建水文模型, 结合物理模拟试验结果对数值计算模型进行优化。采用控制变量法, 利用优化后的模型计算在不同裂缝形状、地形以及初始含水量条件下裂缝周围土壤含水量与非变形区土壤含水量差值。[结果] 裂缝宽度主要影响土壤水分散失量的最大值, 而裂缝深度主要影响散失量最大值出现的位置; 裂缝对上坡方向和下坡方向影响规律存在差异, 且坡度越大, 差异越明显; 土壤初始含水量越小, 裂缝对土壤水分扰动程度越小; 当初始含水量低于 20% 时, 地表裂缝对土壤水分的影响范围不超过 15 cm。[结论] 在相同边界条件下, 土壤水分模拟试验结果与物理试验数据变化规律呈现一致性, 利用优化后的数值计算模型可以定量地分析黄土覆盖区土壤水分对采动地表裂缝的响应特征。

**关键词:** 采动地表裂缝; 土壤水分; 物理模拟装置; Hydrus 数值模拟; 黄土覆盖区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0040-09

中图分类号: X833

**文献参数:** 汤伏全, 贾晓卉, 侯恩科, 等. 黄土覆盖区采动地表裂缝对土壤水分扰动影响的模拟试验研究 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 40-48. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.006; Tang Fuquan, Jia Xiaohui, Hou Enke, et al. Simulation experiment on effect of surface cracks caused by coal mining on soil moisture disturbance in loess-covered area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 40-48.

## Simulation Experiment on Effect of Surface Cracks Caused by Coal Mining on Soil Moisture Disturbance in Loess-Covered Area

Tang Fuquan<sup>1</sup>, Jia Xiaohui<sup>1</sup>, Hou Enke<sup>2</sup>, Fan Zhigang<sup>3</sup>, Ma Ting<sup>1</sup>, Wang Cong<sup>1</sup>

(1. Institute of Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 3. Shaanxi Binchang Wenjiapo Mining Limited Company, Xianyang, Shaanxi 713504, China)

**Abstract:** [Objective] The effect of surface cracks caused by coal mining on soil moisture changes in a loess-covered area was studied in order to provide data support for the study of soil moisture changes in coal mining subsidence area. [Methods] The study was conducted in a coal mining subsidence location in a loess-covered area. A self-developed mining subsidence surface crack simulation device was used to carry out physical simulation experiments. Soil moisture sensors were set around the cracks to analyze the characteristics of soil moisture changes caused by surface cracks. Hydrus software was used to build the hydrological models and to optimize them using the results of physical simulation experiments. The control variable method was used with the optimized model to calculate the differences between soil moisture content around surface cracks and soil moisture content in non-deformation areas under different fracture shapes, topography, and initial water contents. [Results] Crack width mainly affected the maximum crack-induced soil moisture loss. Crack depth mainly affected the location of the maximum crack-induced soil moisture loss. There were differences in the

收稿日期: 2022-11-10

修回日期: 2023-04-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土覆盖区采煤沉陷对土壤水分扰动的时空特征与机理”(52274168)

第一作者: 汤伏全(1966—), 男(汉族), 湖南省湘潭市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事开采沉陷与雷达遥感研究。Email: 2504557922@qq.com。

influence of cracks in the uphill direction and in the downhill direction. The larger the slope was, the more obvious the differences were. The smaller the initial soil moisture content was, the smaller the soil moisture disturbance by cracks was. When the initial soil water content was less than 20%, the impact of surface cracks on soil moisture was less than 15 cm away from the crack. [Conclusion] Under the same boundary conditions, the soil moisture simulation results were consistent with the changes observed in physical experimental results. The optimized hydrological model could be used to quantitatively analyze the disturbance characteristics of soil moisture resulting from surface cracks in loess-covered areas.

**Keywords: surface cracks caused by coal mining; soil moisture; physical simulation device; Hydrus numerical simulation; loess-covered area**

西部黄土高原地处黄河中上游生态脆弱区,是中国煤炭资源开发的主要基地<sup>[1]</sup>。大规模地下采煤已引起严重的地面沉陷及损害,导致资源开发与环境保护之间的矛盾日益突出<sup>[2]</sup>。土壤水分运移在很大程度上控制着土壤—植被系统和区域生态系统的演化,同时也是自然界水循环的关键环节,是连接大气、植被和地下水的纽带。开采沉陷变形导致地表裂缝发育,改变了微地貌形态和土壤物理特性,显著扰动了土壤水分的补给、运移和蒸发状态<sup>[3]</sup>。

采动地表裂缝是黄土覆盖区开采沉陷变形的重要表现形式。已有研究通过实地观测和相似材料模拟等方法,揭示了地质采矿条件与地表裂缝发育特征,如裂缝位置、形状、深度和宽度等之间的关系<sup>[4-7]</sup>。黄土覆盖区具有黄土沟壑区地貌特征,土层厚度占开采深度的30%~70%,地表黄土层的物理特性既不同于岩层,也有别于东部矿区的饱水黏土层,这导致黄土覆盖区开采沉陷引起的地表裂缝与破坏相较于其他矿区具有一定的特殊性<sup>[8]</sup>,具体表现为地表变形更为剧烈,下沉速度大,起动距偏小,裂缝角偏大,地表裂缝发育特征明显。裂缝深度和宽度与开采沉陷变形和地貌特征指标密切相关,可根据地表水平变形指标与黄土层物理力学指标进行估算<sup>[9-10]</sup>。矿区开采沉陷变形对土壤水分会造成显著的扰动效应,尤其以地表裂缝对土壤水分运移的影响为甚。在西部黄土覆盖区特定的地貌、气候、降雨和蒸发条件及开采沉陷引起的土壤物理特性改变、地形变化、地表裂缝等因素共同影响下,矿区土壤水分的变化规律更加复杂。近年来,一些学者通过现场采样如烘干法<sup>[11]</sup>和时域反射法<sup>[12]</sup>(time domain reflectometry, TDR)等,比较了塌陷裂缝区与非变形区的土壤水分变化规律,结果表明地表裂缝对土壤水分运移造成明显的影响,距地表裂缝越近,影响程度越大。在此基础上,后续学者<sup>[13]</sup>通过对不同尺度及位于不同地形的裂缝土壤水分进行定期监测,进一步揭示了裂缝宽度与坡度对土壤水分运移存在扰动关系。然而矿区环境复杂多变,影响土壤水分变化的因素众多,裂缝形状、发育

特点、出现位置等因采矿条件和进度不同而有所差异。野外采样中发现土壤水分运移呈现显著的时空分异性,上述现场采样方法真实可靠但是代表性较差。目前,对地表裂缝引起土壤水分变化的研究大多停留在固定点位长时序监测,对裂缝引起土壤水分变化的因素探究尚无具体结论。针对采煤沉陷区地表裂缝对土壤水分的扰动影响,采用室内模拟试验方法可便捷定量的分析不同土壤类型及地形条件的水分运移过程<sup>[14-16]</sup>。为了探究黄土覆盖区采动地表裂缝对土壤水分的扰动特征,本研究利用自主研发的开采沉陷地表裂缝模拟装置,对采动地表裂缝周围土壤水分变化进行监测和分析。进一步采用 Hydrus 软件构建水文模型,对采动地表裂缝周围的土壤水分运移进行数值模拟分析,结合物理模拟试验结果对数值计算模型进行优化,分析不同形状和土层特性的采动地表裂缝对土壤水分的扰动影响,旨在揭示采动地表裂缝与土壤水分运移的量化关系,为研究采煤沉陷区土壤水分变化规律提供试验数据支撑。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 采动地表裂缝和土壤水分物理模拟

1.1.1 采动地表裂缝发育特征 矿区地表裂缝是采空区上覆岩层移动与表土层形变耦合的结果,是煤矿典型的采动损害形式之一<sup>[17]</sup>。根据土力学原理,当开采沉陷引起的拉伸应力克服土体凝聚力时,导致土层结构破坏产生地表裂缝。典型黄土覆盖区开采沉陷过程中当地表土层侧向水平应力大于土体抗拉强度时,产生拉伸破坏形成地表裂缝。在工作面推进方向前方地表因动态拉伸变形产生动态裂缝(图1)。随着工作面继续推进,地表因受到压缩变形,致使大部分动态裂缝缓慢闭合;在工作面两侧顺槽上方地表因受到持续性拉伸而产生永久性裂缝,其宽度与倾向主断面上地表水平变形量相关;在工作面开切眼及停采线上方地表因受到拉伸和剪切应力作用而产生台阶式裂缝,其宽度和台阶高度与开采的深厚比相关。

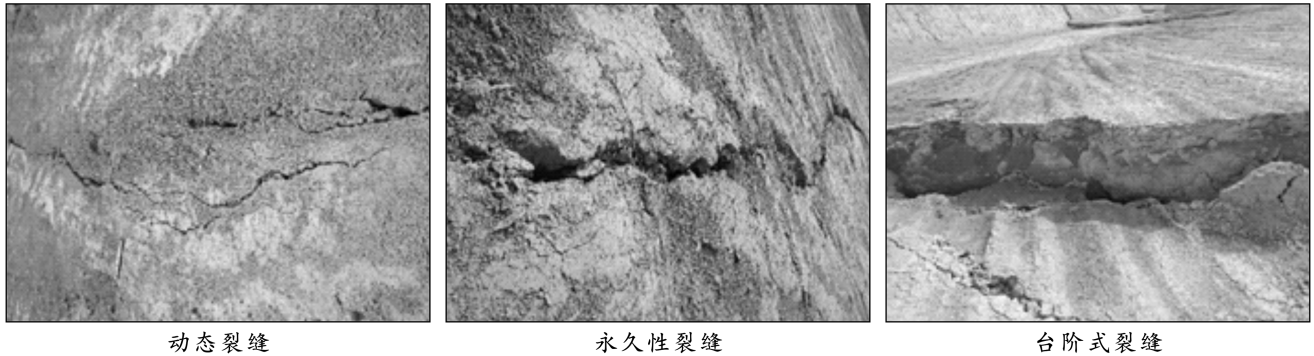


图 1 矿区采动地表裂缝图像

Fig.1 Images of surface cracks caused by coal mining

采动地表裂缝发育的深度取决于拉伸变形产生的附加拉应力与土体凝聚力及自重力侧向应力的平衡关系。根据土骨架的线弹性应力应变关系式可导出采动地表裂缝发育深度  $h_m$  的计算公式<sup>[18]</sup>：

$$h_m = \frac{E}{\mu \cdot \gamma} \cdot \epsilon_x - \frac{1-\mu}{\mu \cdot \gamma} \cdot c \quad (1)$$

式中： $E$  表示土层压缩模量 (Pa)； $\mu$  表示土层泊松比； $c$  表示土层凝聚力 (Pa)； $\gamma$  表示土层密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

可见，采动裂缝深度  $h_m$  取决于地表开采水平变形  $\epsilon_x$  及土层的强度参数与弹性参数。取  $h_m = 0$ ，得到地表产生裂缝的临界水平变形值 ( $\epsilon_m$ )：

$$\epsilon_m = \frac{1-\mu}{E} \cdot c \quad (2)$$

在开采扰动过程中，当地面某处  $\epsilon_x = \epsilon_m$  时， $\epsilon_x = \epsilon_m$  地表开始产生裂缝。随着工作面继续推进，当地表变形达到最大值时，采动裂缝深度也达到最大。本文试验区彬长文家坡煤矿地表黄土层垂直节理发育，土体抗拉伸变形能力较小，极易形成地表裂缝。根据野外土样试验得出黄土层物理力学指标为： $E = 8.8 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.3$ ， $c = 30 \text{ kPa}$ ，计算临界水平变形值  $\epsilon_m = 2.38 \text{ mm}/\text{m}$ ，说明当地表水平拉伸变形超过该临界值时，将形成采动裂缝。

**1.1.2 采动地表裂缝物理模拟** 采动地表裂缝发育周期长，裂缝周围土壤水分变化受复杂自然环境因素的影响极大，难以定量研究采动裂缝对土壤水分产生的扰动影响。鉴于此，本研究自主研发了采动裂缝物理模拟装置，模拟开采沉陷引起地表裂缝的过程，并在裂缝周边布设传感器来监测土壤水分的时序变化，分析裂缝对土壤水分的扰动特征。该装置由沉陷模拟箱、升降装置以及可移动摄像装置组成，能够逼真模拟煤层开采引起的地表裂缝<sup>[19]</sup>。

物理模拟以彬长文家坡煤矿 4105 工作面为模型。2022 年 3 月初在该工作面地表采集黄土样本，

根据美国农业部 (United States Department of Agriculture, USDA) 对土壤粒径的分类标准，其机械组成为：30.65% 沙粒、60.47% 粉粒和 7.88% 黏粒，土壤含水量平均值为 29%，容重  $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。将物理模拟装置放置于平地，调节升降装置使测试板紧挨窗口上方，将现场黄土试样调制特定含水量的土体装入试验箱体并夯实，向下调节测试板使顶板垮落下沉，直至地表形成一定宽度和深度的裂缝。经过反复试验发现，土壤体积含水量和密实度对于模拟裂缝的形成具有显著影响，通过调节测试板位置可以很好地控制地表裂缝的宽度和深度，利用数码相机拍摄模型图像来记录和确定地表裂缝的形成过程及裂缝形状。模拟试验中采动地表裂缝图像如图 2 所示。从图 2a 的正射图可以看出，采动裂缝发生在模拟开挖边界外侧地表，呈现为 C 形分布，裂缝边缘呈分叉状态。从图 2c 的剖面影像可见，裂缝是蜿蜒向上发育的，其实际深度比从地表可见的更大。试验表明，裂缝的深度、宽度与模拟开采厚度及模型土层厚度呈现明显的量化关系。本试验中地表土层密实度为  $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，厚度 40 cm，测试板下降 3 cm，所形成的采动裂缝最大宽度为 1.5 cm，深度为 30 cm。

**1.1.3 土壤水分物理模拟试验** 为了探究裂缝对土壤水分的影响，在上述模拟裂缝的地表 10 cm 深处分别距离裂缝 10、25 和 45 cm，距裂缝 10 cm 深度为 20 和 30 cm 的位置埋设 EC-5 水分传感器，设置采样间隔为 6 h，获取点位的土壤含水量。

在 20220313—20220324 期间对各监测点进行 12 d 的连续观测，绘制距裂缝不同距离的监测点土壤含水量随时间变化的曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出，各监测点土壤含水量随时间呈下降趋势，点位下降速率因裂缝因素而存在差异。为了比较下降速度差异，对土壤含水量随时间的变化数据进行线性拟合，斜率绝对值代表土壤含水量随时间变化的速率。

距裂缝 10, 25 和 45 cm 的拟合曲线斜率绝对值分别为 0.57, 0.37 和 0.31, 表明距裂缝越近时, 其斜率绝对值越大, 裂缝对土壤水分的扰动效应越明显。物理模拟试验结果与野外试验结果一致。除此外, 物理模拟试验不受植被、地形等干扰, 利用长时序观测数据可以定量得出裂缝对土壤水分影响的时空特征, 且规律性较强。

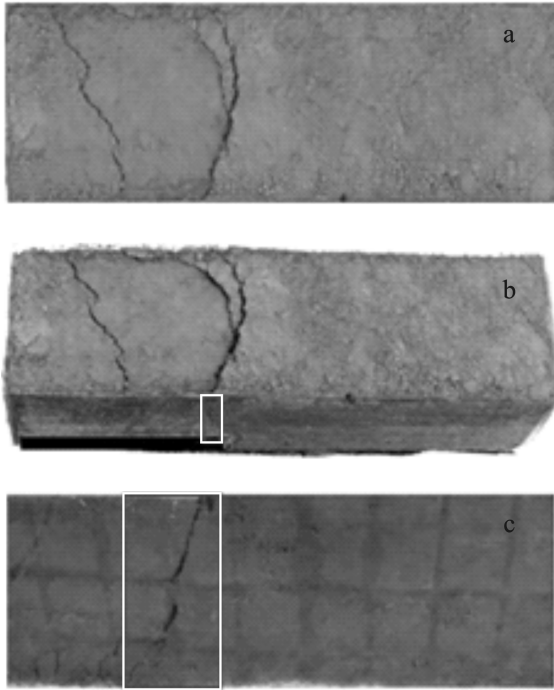


图 2 模拟采动地表裂缝图像

Fig.2 Images of surface cracks simulated

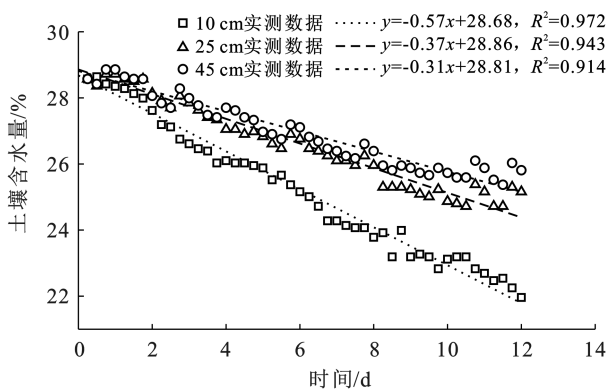


图 3 土壤含水量随时间的变化

Fig.3 Variation of soil water content with time

## 1.2 采动裂缝对土壤水分影响数值模拟

1.2.1 土壤水分运移数值模拟方法 物理模拟试验虽能较好地改善野外诸多因素的干扰, 但仍存在模型尺度小、仅能散点观测等缺点。数值模拟则可以更灵活地控制外界条件, 直观方便地分析任意位置的土壤水分变化。目前应用广泛的水动力学模型是基于达

西定律导出的非饱和土壤水分运动方程<sup>[20]</sup>发展而来的, 利用该模型开发的数值分析软件 Hydrus 已广泛应用于土壤水分和溶质运移过程模拟<sup>[21]</sup>。地表裂缝对土壤水分影响作用部位及方向不同, 尤其表现在降雨优先流现象中。王策等<sup>[22]</sup>基于水量平衡原理利用 Hydrus-2D 建立了双边界裂隙优先流渗透模型, 并与染色示踪试验结合分析, 验证了构建 Hydrus 双边界模型在裂缝优先流试验中的合理性。煤炭开采造成的大型地表裂缝蒸发机理是目前难以破解的科学难题, 可以借鉴上述文献中的研究思路, 建立裂缝深度与蒸发量的关系函数, 设置双边界模型。但开展试验发现, 裂缝不同深度蒸发量难以分段获取, 且 Hydrus 模型水分流动受蒸发和内部运移等多种因素影响, 在裂缝中水分运动方向与平坦地表存在差别。因此本文参考张健等<sup>[23]</sup>试验方法, 将采动裂缝视为临空界面, 利用 Hydrus-2D 软件构建数值分析模型, 模拟裂缝周边土壤水分的运移过程。数值模拟的边界条件依据物理模拟试验条件设置, 包括采动裂缝在内的土壤上边界设置为大气边界, 下边界为自由流通边界, 模型两侧为零通量边界。所设置 Hydrus-2D 初始数值模型的剖面大小、裂缝状态、外界条件与物理模拟试验相同。模型长 100 cm, 高 40 cm, 地表裂缝宽 1.5 cm, 深 30 cm(如图 4 所示)。

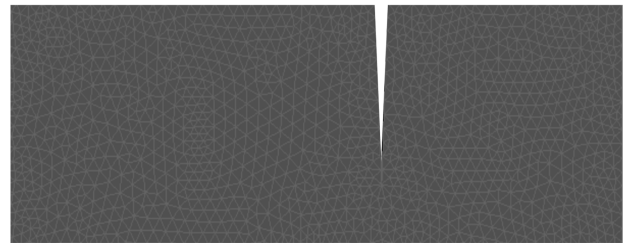


图 4 Hydrus-2D 初始数值模型边界条件

Fig.4 Boundary conditions of Hydrus-2D initial numerical model

1.2.2 数值模型参数获取 土壤水分运动参数可利用 Hydrus-2D 软件自带的功能由土壤物理组成反演出来, 但采动裂缝条件下土壤水分数值模拟缺乏文献资料借鉴, 本文模型所设定的边界条件、黄土物理特性、裂缝形状特征均从物理模拟或实际条件简化而来, 直接利用软件反演的土壤水分运动参数不可避免地存在偏差。

为了保证数值模拟结果的可靠性, 利用物理模拟结果对数值模型进行参数优化。通过初始模型开展数值模拟, 记录不同的土壤水分运动参数下含水量随时间变化的模拟结果, 将相同时段数值模拟的含水量数据与物理试验结果组成数据集, 根据最小二乘原理和最优化方法来进行模型参数的优化。定义目标函

数为数值模拟值与物理试验值之间的带权重函数,其表达式为:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (O_{wi} - S_{wi})^2 W_i^2 \quad (3)$$

式中: $\varphi$  为目标函数;  $n$  为观测点个数;  $O_w$  为物理试

验的含水量值;  $S_w$  为数值模拟的含水量值;  $W$  为权重系数。

根据黄土性质设置土壤水分运动参数的阈值区间,使目标函数在设定范围内取最小值,通过优化后数值模拟的模型参数如表 1 所示。

表 1 优化后数值模拟的模型参数

Table 1 Model parameters of optimized numerical simulation

参数	残余含水量 $\theta_r$ / ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水量 $\theta_s$ / ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Alpha(进气值) / ( $\text{L} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	孔隙分布指数 $n$	饱和导水率 $K_s$ / ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )
数值	0.082 137	0.570 87	0.007 593 7	1.413 8	15

利用上述模型参数构建数值模型,采用不同深度的数据进行模型精度验证,得到对应监测点土壤含水量随时间变化的特征曲线(如图 5 所示)。图中连续曲线为数值模拟结果,离散点表示对应的物理试验结果。

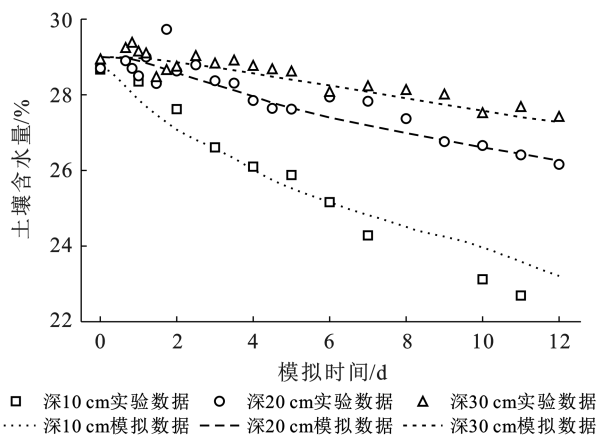


图 5 数值模拟与物理试验结果对比

Fig.5 Comparison of numerical simulations with physical experimental results

从图 5 可知,参数优化后数值模拟中土壤水分随时间的变化趋势与物理试验基本一致。为评定数值模拟结果的精度,以物理试验数据为基础,利用两者之间的偏差值所计算的均方根误差(RMSE)来评定数值模拟结果的可靠性,其计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{wi} - O_{wi})^2} \quad (4)$$

式中: $S_w$  为数值模拟的含水量值;  $O_w$  为物理试验含水量值;  $n$  为样本数量; RMSE 为均方根误差,该值越接为 0 时表示模拟效果越好,结果表明所建立的数值计算模型及其参数能够用于黄土层采动地表裂缝周边土壤水分运移的模拟分析。

### 1.3 各因素数值分析基准模型

自然环境下影响土壤水分运移的主要因素包括

地形、土壤理化性质、气象、植被等。从开采沉陷对于土壤扰动的角度分析,采动地表裂缝增加了土壤与外界的接触界面,使土壤内部水汽扩散从而增大了土壤水分散失强度;从土壤内部结构分析,开采沉陷变形直接改变了土壤的物理特性,尤其拉伸变形使得土壤容重减小及孔隙度增大,导致土壤水分入渗速率增加<sup>[24]</sup>;从地形方面分析,不同地形坡度条件下土壤水分运移存在显著差异<sup>[25]</sup>。为了探究这些因素对土壤水分的影响,采用上述参数优化后的 Hydrus 模型来模拟分析开采地裂缝形状、初始含水量、地形坡度等对土壤水分运移的扰动规律。模拟分析中以外界条件相同且不存在采动裂缝的基准模型作为对比,模拟时气象条件、潜在蒸发量、格网单元划分及边界条件均与物理试验及初始模型保持一致。根据黄土覆盖区典型煤矿文家坡 4105 工作面裂缝的调研,设置基准模型长度 200 cm,高度 200 cm,采动裂缝深度 100 cm,宽度 8 cm,土壤初始含水量 30%,模拟土壤水分蒸渗时长 60 d(20220501—20220629),选取地表以下 15 cm 深的水平剖面 and 距离裂缝 20 cm 的垂直剖面作为监测剖面(如图 6 所示)。

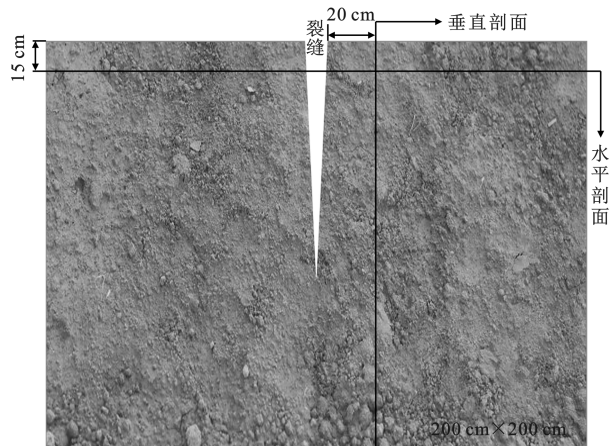


图 6 地表裂缝土壤水分模拟基准模型  
Fig.6 Benchmark model of soil moisture simulation in surface crack

本文采用土壤水分散失量  $C_w$  (crack induced soil water loss) 来表示因采动裂缝造成的土壤含水量损失,其计算式为:

$$C_w = (W_{jz} - W_{js}) - (W_{lz} - W_{ls}) \quad (5)$$

式中: $C_w$  为因裂缝造成的任一点处土壤水分散失量; $W_{jz}$  为不存在裂缝的对比模型中该点最终(第60 d)的含水量; $W_{js}$  为不存在裂缝的对比模型中该点初始(第0 d)含水量; $W_{lz}$  为存在裂缝时同一点位最终(第60 d)的土壤含水量; $W_{ls}$  为存在裂缝时同一点位初始(第0 d)土壤含水量。

利用该式来定量地描述采动裂缝对于土壤水分

的扰动影响程度。当  $C_w < 1\%$  时,认为裂缝对土壤水分产生的影响很小。

## 2 结果与讨论

### 2.1 采动裂缝宽度对土壤水分的影响

为探究裂缝宽度对土壤水分扰动的影响,采用控制变量方法将基准模型中的采动裂缝宽度分别设置为:4 cm, 8 cm, 12 cm 和 16 cm。

在模拟实验 60 d 后裂缝周边水平监测剖面(图 7a)和垂直剖面(图 7b)上土壤水分散失量的变化曲线如图 7 所示。

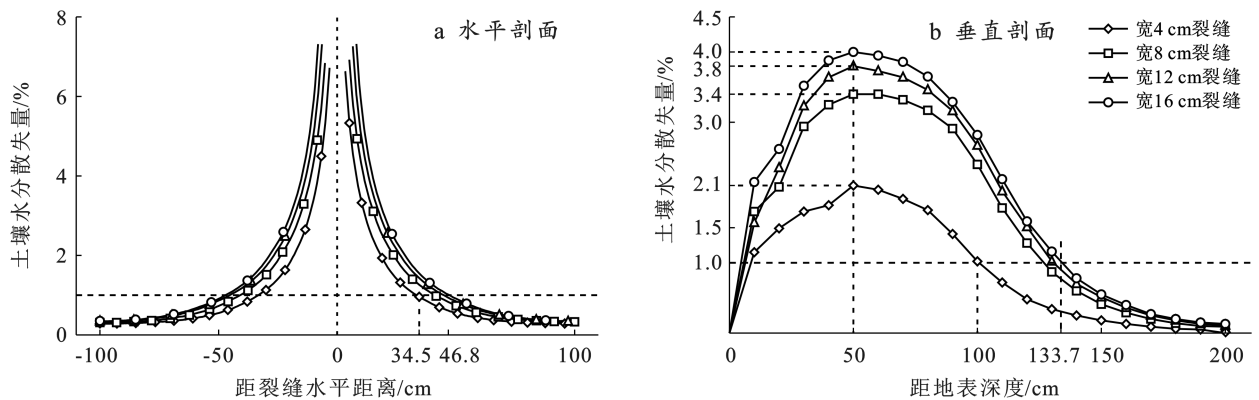


图7 不同宽度裂缝土壤水分散失量变化曲线

Fig.7 Curves of crack induced soil moisture loss with width

从图 7 可知,水平剖面上裂缝两侧曲线具有对称性,离裂缝越近时土壤水分散失量越大,当裂缝宽度从 4 cm 增大到 16 cm 时,土壤水分受裂缝影响( $C_w > 1\%$ )范围从 34 cm 扩大至 47 cm,说明裂缝宽度对水平方向的水分运移存在不可忽视的影响,当超过这个范围时,土壤水分散失量小于 1%,此时裂缝影响变得很小;垂直剖面上从地表往下土壤水分散失量呈现先增大后减小的趋势,在距地表 50—60 cm 深度(图 7b)处土壤水分散失量最大,当裂缝宽度从 4 cm 增大至 16 cm 时,对土壤水分的影响深度从 100 cm 加深至 133 cm 左右。在同一深度,裂缝越宽水分散失量越大。从图 7 中可以明显看出当裂缝深度固定时,土壤水分散失量最大数值与裂缝宽度存在明显函数关系,因此增加不同裂缝宽度的试验,绘制垂直剖面土壤水分散失量最大值随裂缝宽度的曲线如图 8 所示,可发现裂缝宽度与土壤水分散失量最大值之间存在定量关系。

### 2.2 采动裂缝深度对土壤水分的影响

将基准模型中裂缝深度设为 50, 75, 100, 125 和 150 cm,分析不同深度裂缝在水平剖面和垂直剖面上土壤水分散失量变化,结果如图 9 所示。

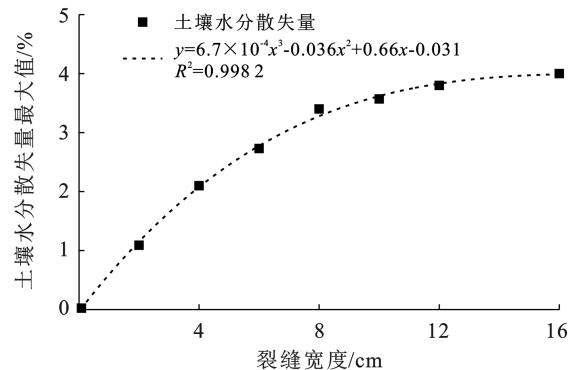


图8 土壤水分散失量最大值随裂缝宽度的变化

Fig.8 Variation of maximum crack induced soil moisture loss with widths

由图 9 可知,在水平监测剖面上,不同深度裂缝土壤水分散失量变化曲线基本重合,土壤水分散失量超过 1% 的位置都在距裂缝水平 35 cm 位置,说明近地表土壤水分变化与采动裂缝发育深度关系很小,而与其距采动裂缝距离关系较大,距离裂缝越近土壤水分散失量越大;在垂直监测剖面上,土壤水分散失量变化曲线先增大后减小,最大值达 3.4%。在近地表土壤水分几乎不受裂缝深度影响,当土壤水分散失量出现最大值后曲线开始下降。经过对垂直剖面监测

数据分析,土壤水分散失量最大值出现的深度随裂缝深度变化的曲线如图 10 所示。土壤水分散失量最大

值所处深度与裂缝深度存在定量关系,必要时可以通过拟合函数来描述。

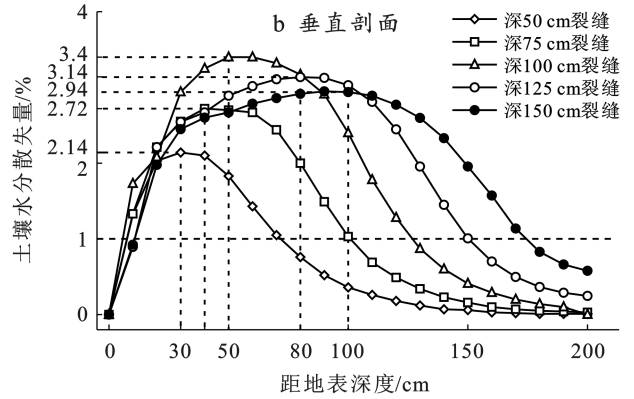
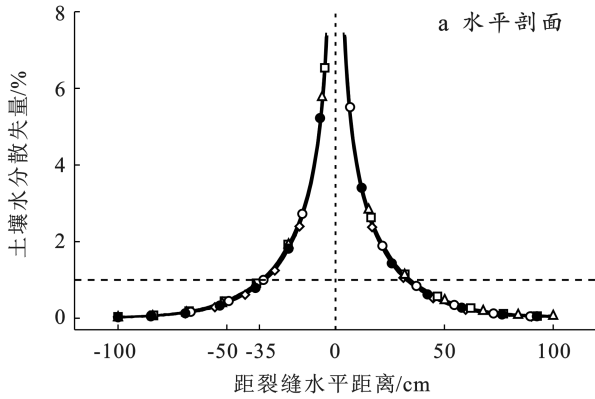


图 9 不同深度裂缝土壤水分散失量变化

Fig.9 Variation of crack induced soil moisture loss with depths

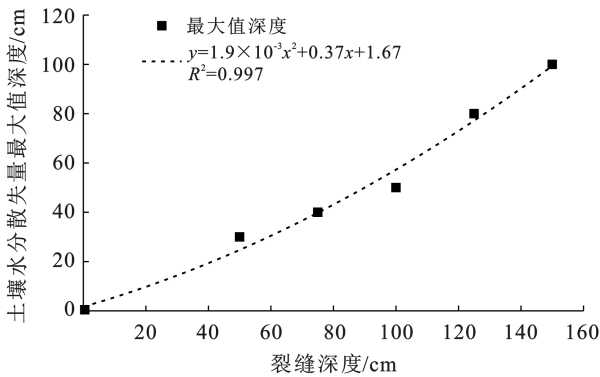


图 10 土壤水分散失量最大值出现的深度随裂缝深度的变化  
Fig.10 Depth of maximum soil moisture loss varies with depth of cracks

### 2.3 不同初始含水量对土壤水分的影响

在采动裂缝改变土壤水分入渗和蒸发方式的情况下,通过改变模型的初始含水量可分析土壤水分散失量的变化特征。将基准模型中土壤初始含水量分别设定为 11%,14%,17%,20%,30%,40%,分析不同初始含水量情况下,在水平剖面和垂直剖面上土壤水分散失量的变化,其结果如图 11 所示。从图 11 分析可得,在水平剖面上随初始含水量的增加,裂缝对

土壤水分的扰动影响范围增大,当初始含水量从 11%增加到 40%时,裂缝对土壤水分变化影响逐渐增大,相同位置,初始含水量越低,裂缝对土壤水分造成的影响越小,尤其是初始含水量在 20%以下时,在基准裂缝模型下对含水量的影响范围仅在裂缝周边 15 cm 以内,超出 15 cm 的部分裂缝对土壤水分造成的影响与无裂缝时相比差值在 1% 以内,认为影响很小。土壤初始含水量越高时水分散失量越大,初始含水量在 30%~40%时,影响范围和土壤水分散失量值明显增大。

在垂直剖面上土壤散失量差别非常明显,当初始含水量较大时,裂缝对土壤水分的影响较为明显,最大散失量超过 3%,影响深度超过 120 cm,超过最大散失位置后,随深度增加影响减小。当初始含水量在 11%到 20%时,裂缝对土壤水分的影响急剧降低,水平影响范围不超过 20 cm,结合水平剖面影响分析,说明此时裂缝对土壤水分散失量的影响仅在 15 cm 范围内,超出该位置,影响可忽略不计。该结果说明采动地表裂缝对土壤水分的扰动影响与土壤本身的初始含水量有密切关系。

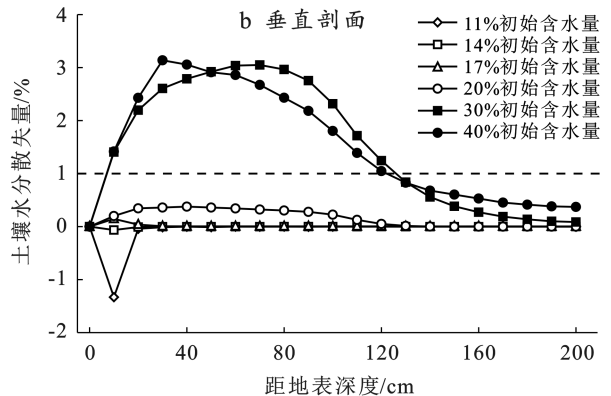
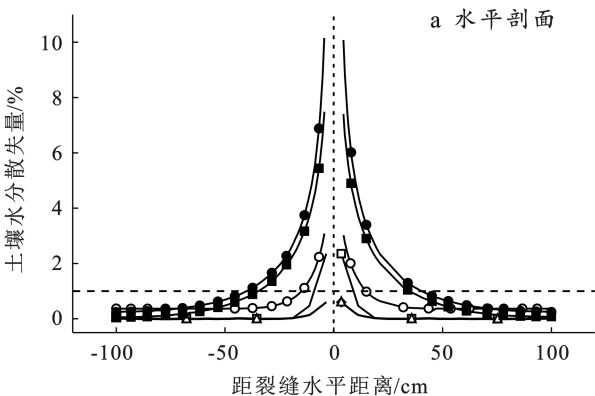


图 11 土壤水分散失量随不同初始含水量的变化

Fig.11 Variation of soil moisture loss with different initial soil moisture contents

## 2.4 不同地表坡度对土壤水分的影响

黄土覆盖矿区地形起伏多变,坡面形态对裂缝周围土壤水分运移有着不可忽略的影响。在基准模型条件下通过改变地表坡度来模拟分析裂缝上坡和下坡方向上土壤水分运移的变化。图 12 为斜坡上的采动裂缝土壤水分模拟计算剖面。

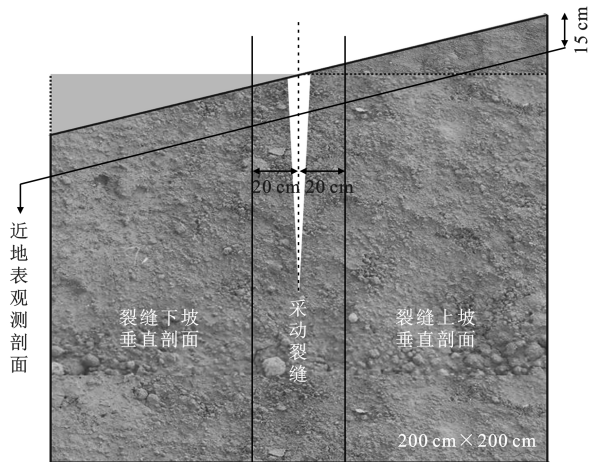


图 12 黄土覆盖区斜坡上采动裂缝数值模拟剖面

Fig.12 Numerical simulation of coal-mining-induced crack on slope in loess-covered areas

保持基准模型的外界条件与采动裂缝位置不变,设置地表坡度分别为  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  和  $45^\circ$ ,与平坦地面(无坡度)模型对比,绘制各个观测剖面上土壤水分散失量分布曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出,地形坡度对土壤水分的影响具有特殊性。在近地表

观测剖面(图 13a)中可以明显看出裂缝两侧土壤水分散失量分布失去对称性,裂缝上坡方向不同坡度的土壤水分变化曲线几乎重叠,土壤水分受影响区域都在距裂缝 40 cm 以内,说明在裂缝上坡方向,坡度变化的影响很小。在裂缝下坡方向不同坡度的土壤水分散失量差别明显,表现为坡度越大时土壤水分散失量越大,且土壤水分散失量受裂缝影响的范围越大,当坡度从  $0^\circ$  增大到  $45^\circ$  时,土壤水分受影响的范围从距裂缝 40 cm 扩大到 80 cm,说明近地表位置,裂缝下坡方向土壤水分受到坡度的影响更大。在垂直剖面(图 13b)和(图 13c)中,土壤水分在距地表一定深度呈现出相反的规律。表现为裂缝上坡垂直剖面(图 13b)中,距地表 90 cm 深度内无坡度时土壤水分散失量更大,而坡度越大时土壤水分散失量越小,当超过 90 cm 后其规律相反。在裂缝下坡垂直剖面(图 13c)中,距地表 60 cm 深度内无坡度时土壤水分散失量更小,且坡度越大时土壤水分散失量越大,当超过 60 cm 后其规律相反。分析产生上述特征的原因,认为不同位置和深度土壤水分受裂缝和坡度影响的程度存在差别。在无裂缝的斜坡上土壤水分受重力影响会造成下坡含水量高于上坡的现象,而裂缝的存在使得坡面上下截断,打破了这种运移规律,造成下坡的土壤水分散失量增大。在土壤深部,裂缝的影响变小,而坡度的影响则变大,此时土壤水分随坡度变陡流向下坡的趋势增大,导致上坡的土壤水分散失量较无坡度更大,而下坡土壤水分散失量较无裂缝更小。

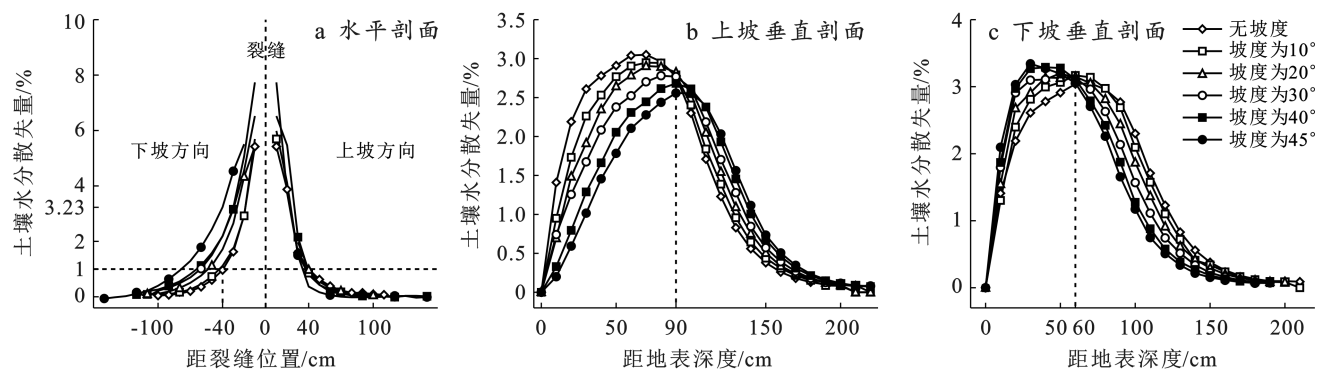


图 13 黄土覆盖区不同坡度土壤水分散失量变化

Fig.13 Curves of crack induced soil moisture loss under different slopes in loess-covered areas

## 3 结论

(1) 所研制的采动地表裂缝物理模拟装置能够模拟开采沉陷引起地表裂缝形成及其对土壤水分的扰动影响。相较于野外试验而言,物理模拟可以控制外界条件变量,通过监测土壤水分变化揭示采动地

表裂缝对土壤水分运移的扰动特征,也为计算机数值模拟提供了模型参数优化工具。

(2) 利用 Hydrus 数值模拟软件能够快速有效地分析采动地表裂缝条件下土壤水分运移的时空变化特征。通过控制变量方式分析了土壤水分散失量与裂缝宽度、深度、土壤初始含水量、地形坡度等因素之



间的量化关系,初步揭示了采动地表裂缝对于近地表土壤水分运移的扰动影响。

(3) 本文模拟试验表明,黄土覆盖区采动地表裂缝对土壤水分的扰动影响与裂缝发育特征、土壤物理水文特性、地形特征等存在复杂的耦合关系,其中模型参数的合理选取对试验结果有重要影响,而降雨条件下采动裂缝对土壤水分的扰动影响也不容忽视,有待进一步开展降雨条件下土壤水分变化的模拟研究和野外实地土壤水分监测研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 卞正富,于昊辰,雷少刚,等.黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J].煤炭学报,2021,46(5):1378-1391.
- [2] 王双明,申艳军,孙强,等.西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(4):5-19.
- [3] Khan M N, Gong Y, Hu T, et al. Effect of slope, rainfall intensity and mulch on erosion and infiltration under simulated rain on purple soil of South-Western Sichuan province, China [J]. Water, 2016,8(11):528-546.
- [4] Palchik V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction [J]. Environmental Geology, 2005,48(1):68-80.
- [5] 魏宗勇,李树刚,林海飞,等.大采高综采覆岩裂隙演化特征三维试验研究[J].西安科技大学学报,2020,40(4):589-598.
- [6] 郭俊廷,李全生.浅埋高强度开采地表破坏特征:以神东矿区为例[J].中国矿业,2018,27(4):106-112.
- [7] 汤伏全,李林宽,李小涛,等.基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究[J].煤炭科学技术,2020,48(10):130-136.
- [8] 徐祝贺,李全生,李晓斌,等.浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究[J].煤炭学报,2020,45(8):2728-2739.
- [9] 刘辉,邓略中,雷少刚,等.采动地裂缝动态发育规律及治理标准探讨[J].采矿与安全工程学报,2017,34(5):884-890.
- [10] Sun Xueyang, Ho Chunhsing, Li Cheng, et al. Inclination effect of coal mine strata on the stability of loess land slope under the condition of underground mining [J], Natural Hazards, 2020,104(25):833-852.
- [11] 吴丽,田俊峰,汤洋,等.干旱半干旱矿区采煤裂缝对土壤水分的影响研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):115-120.
- [12] 张延旭,毕银丽,陈书琳,等. [J].环境科学与技术,2015,38(3):11-14.
- [13] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504.
- [14] Hou Lizhu, Hu B X, Qi Zhiming, et al. Evaluating equilibrium and non-equilibrium transport of ammonium in a loam soil column [J]. Hydrological Processes, 2018,32(1):80-92.
- [15] Wang Jiajia, Long Huaiyu, Huang Yuamfang, et al. Effects of different irrigation management parameters on cumulative water supply under negative pressure irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2019, 224:105743.
- [16] Hartmann A, Simunek J, Aidoo M K, et al. Implementation and application of a root growth module in HYDRUS [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1):1-16.
- [17] 陈超,胡振琪.我国采动地裂缝形成机理研究进展[J].煤炭学报,2018,43(3):810-823.
- [18] 汤伏全,张健.西部矿区巨厚黄土层开采裂缝机理[J].辽宁工程技术大学学报,2014,33(11):1466-1470.
- [19] 贾晓卉,汤伏全,侯恩科,等.一种研究采煤塌陷区地裂缝特征用模拟装置:CN216847791U [P]. 2022-06-28.
- [20] Gui Hanliang, Wu Zhiguo, Zhang Chunping. Comparative study of different types of hydrological models applied to hydrological simulation [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2021,49(8):2000381.
- [21] Dahri Z H, Ludwig F, Moors E, et al. Climate change and hydrological regime of the high-altitude Indus basin under extreme climate scenarios [J]. Science of the Total Environment, 2021,768:144467.
- [22] 王策,张展羽,陈晓安,等.基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J].农业机械学报,2021,52(10):314-326,348.
- [23] 张健.采动地裂缝土壤水分运移规律及伤根微生物修复机理[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
- [24] 殷地迟,王立,蔡国军,等.半干旱黄土丘陵区不同植被类型的土壤水分特征及其稳定性[J].水土保持通报,2020,40(1):65-71.
- [25] Elliott J, Price J. Comparison of soil hydraulic properties estimated from steady-state experiments and transient field observations through simulating soil moisture in regenerated *Sphagnum* moss [J]. Journal of Hydrology, 2020,582:124489.